

## Primärregelung mit Windkraftanlagen

Dr. Fred Prillwitz, Dipl.-Ing. Axel Holst, Prof. Dr. Harald Weber

Universität Rostock, Institut für Elektrische Energietechnik, D-18051 Rostock, [www.e-technik.uni-rostock.de/ee](http://www.e-technik.uni-rostock.de/ee),

### Kurzfassung

Das in den nächsten 10 bis 20 Jahren zu erwartende weitere Wachstum der Windenergienutzung stellt neue Anforderungen an die Regelfähigkeit der Windkraftanlagen. Die geplanten leistungsstarken Windparks im Offshore-Bereich der Nord- und Ostsee sollten dann auch Funktionen der durch sie verdrängten konventionellen Kraftwerke übernehmen können. Das trifft insbesondere auf Aufgaben der Netzregelung zu. Unter Berücksichtigung der physikalischen Grenzen ist die Bereitstellung von Primärregelleistung im Sekundenbereich denkbar. Voraussetzung dafür ist eine gegenüber dem heutigen Betrieb veränderte Fahrweise der Windkraftanlagen. Im Beitrag wird die Möglichkeit der Primärregelung durch Windkraftanlagen erläutert und an einem Simulationsbeispiel dargestellt.

### 1 Einleitung

Prognosen gehen davon aus, dass bis zum Jahre 2030 Windkraftanlagen mit einer Gesamtleistung von ca. 40 GW in Deutschland installiert sein werden [1]. Etwa die Hälfte davon werden Offshore-Anlagen sein. Die geplanten großen Windparks in der Nord- und Ostsee werden Nennleistungen erreichen, die mit denen von konventionellen Kraftwerken vergleichbar sind. Für einen sicheren Netzbetrieb in naher Zukunft ergeben sich daher neue Anforderungen an die Windkraftanlagen bezüglich der Regelfähigkeit von Wirk- und Blindleistung sowie dem Verhalten während dem Auftreten bestimmter Netzsituationen. Deshalb wurden beispielsweise in [2] neue Netzanschlussregeln definiert, die ab 2003 im Versorgungsbereich der E.on Netz gelten.

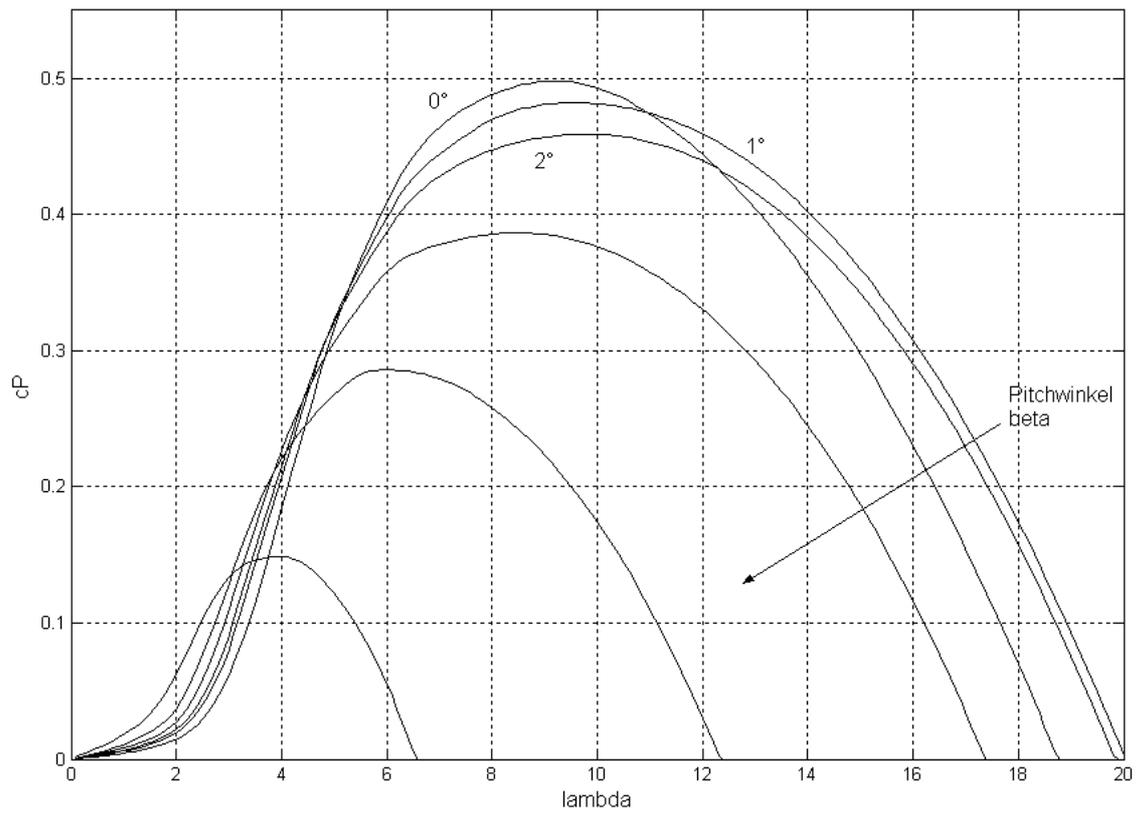
Ausgehend von [2] lässt sich feststellen, dass bezüglich der Wirkleistungsregelung bislang nur ein Abregeln bzw. eine Verringerung der Wirkleistung bei Bedarf gefordert wird. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass die Bereitstellung zusätzlicher Wirkleistung nicht möglich ist, weil die nicht beeinflussbare Windgeschwindigkeit die maximale Leistung vorgibt. Ursache dafür ist der im Normalbetrieb der Windkraftanlage optimale Pitchwinkel, der für maximale Leistungsausbeute sorgt. Wenn die Windkraftanlage jedoch im Normalbetrieb mit nicht optimalem Pitchwinkel betrieben wird, dann würde sich eine positive und negative Reserveleistung ergeben, die mit Hilfe des Pitchwinkels aktiviert werden kann. Bei geeigneter Auslegung dieses Pitchwinkels ergibt sich eine mögliche Reserveleistung, die beispielsweise bei Frequenzabweichungen im Sekundenbereich bereitgestellt werden kann. Dabei kann sich die prozentuale Leistungszunahme bzw. -abnahme immer nur auf die mögliche Leistung am Arbeitspunkt beziehen. Das hat

zur Folge, dass ein Leistungszuwachs um 4% bei Starkwind entsprechend höher ausfällt als bei Schwachwind. Aufgrund der räumlichen Verteilung der zahlreichen Anlagen eines Windparks ist hier aber auch mit Ausgleichseffekten zu rechnen.

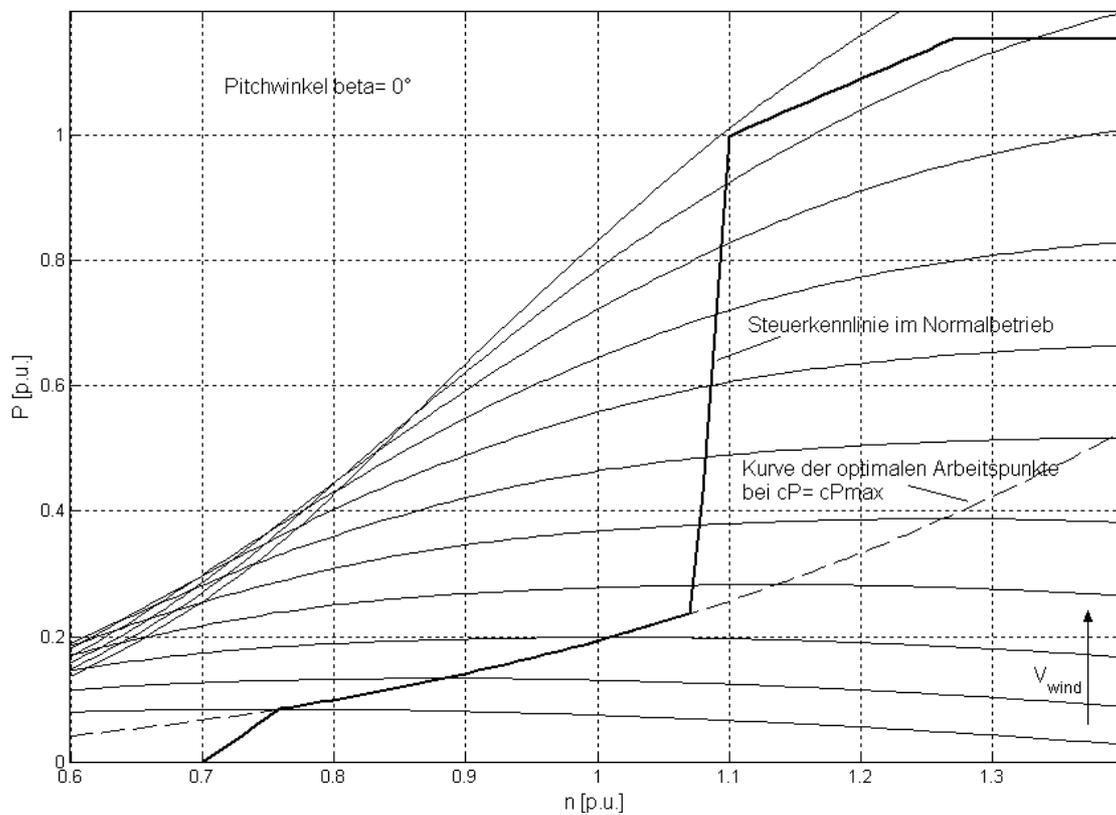
### 2 Allgemeine Betriebsweise von Windkraftanlagen

In **Bild 1** sind mögliche Verläufe des Leistungsbeiwertes  $c_P$  in Abhängigkeit von der Schnelllaufzahl  $\lambda$  bei verschiedenen Pitchwinkeln dargestellt. Die Verläufe sind keinem bestimmten Flügelprofil zugeordnet. Sie wurden ähnlich zu den in [3] dargestellten Kurven festgelegt. Die Leistung der Windkraftanlage ist proportional zum Leistungsbeiwert  $c_P$ . In **Bild 1** wird deutlich, dass es einen optimalen Pitchwinkel (hier  $\beta = 0^\circ$ ) gibt, bei dem der Leistungsbeiwert maximal wird. Der dauerhafte Betrieb der Anlage bei  $\beta = 0^\circ$  und der entsprechenden Schnelllaufzahl  $\lambda = 9.2$  hätte die größte Leistungsausbeute ( $c_P = 0.5$ ) zur Folge. Eine Leistungsverringerung ist durch eine Vergrößerung des Pitchwinkels auf  $\beta > 0^\circ$  problemlos möglich.

Moderne Windkraftanlagen arbeiten mit variabler Drehzahl, so dass sich in einem weiten Betriebsbereich die optimale Schnelllaufzahl einstellen kann. Mit dem in **Bild 1** verwendeten Flügelprofil wurde eine fiktive 5-MW-Windkraftanlage dimensioniert. Für diese Anlage sind in **Bild 2** die Turbinenleistung in Abhängigkeit von der Drehzahl bei verschiedenen Windstärken dargestellt. Aus der eingezeichneten Steuerkennlinie sind die einzelnen Arbeitspunkte ablesbar, die sich bei den jeweiligen Windstärken einstellen. Diese Steuerkennlinie ist vom Anlagenbetreiber frei konfigurierbar und kann sich an Ertrag, Stromrichterverlustleistung, Geräuschpegel, u.a. orientieren. Alle Verläufe in **Bild 2** gelten für den Pitchwinkel mit maximaler Leistungsausbeute, hier  $\beta = 0^\circ$ .



**Bild 1** Leistungsbeiwert in Abhängigkeit von der Schnelllaufzahl und bei verschiedenen Pitchwinkeln



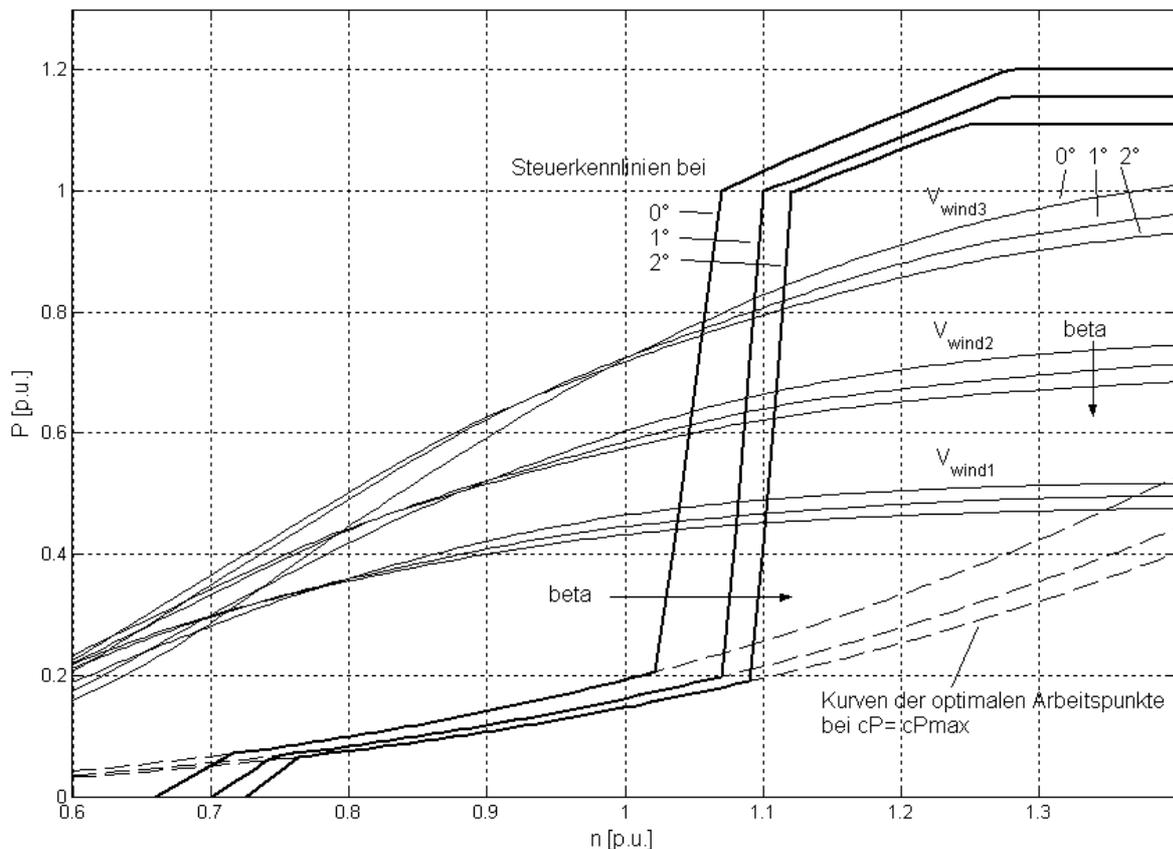
**Bild 2** Turbinenleistung und Steuerkennlinie

### 3 Betriebsweise von Windkraftanlagen mit Primärregelung

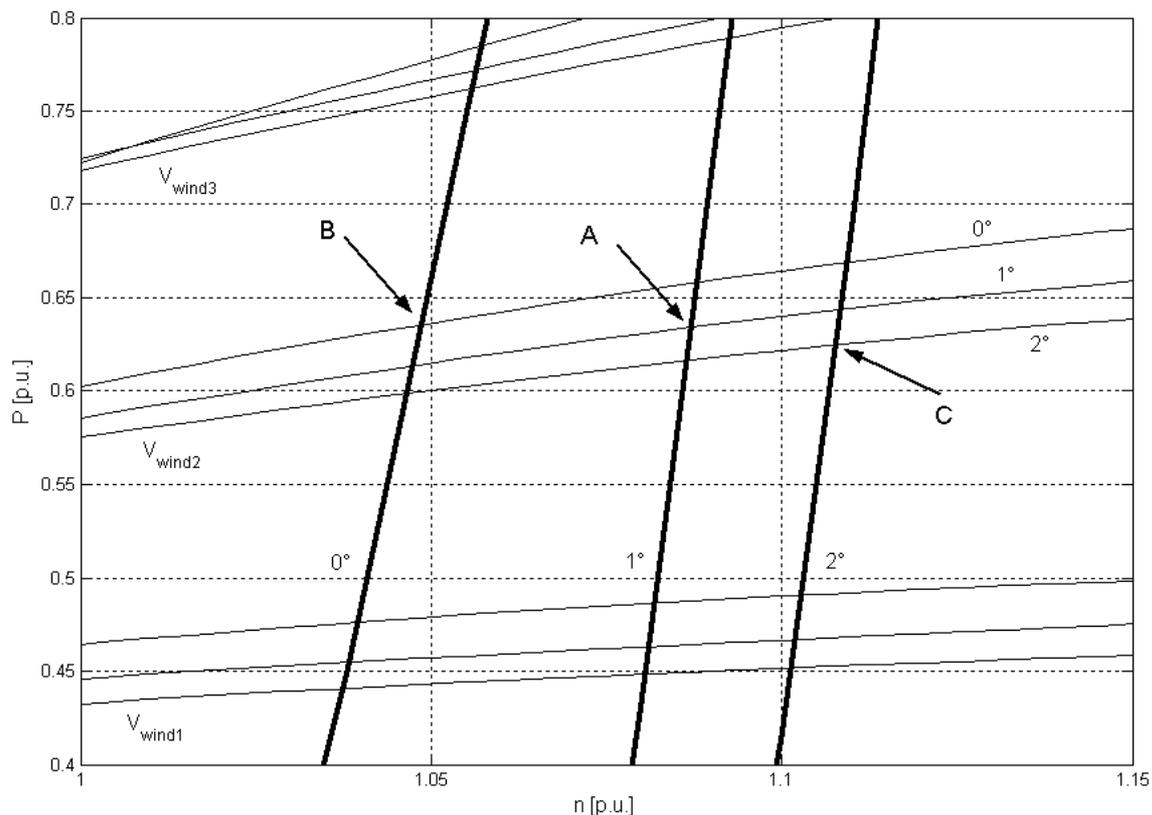
In **Bild 3** sind die die Steuerkennlinie und die Turbinenleistung in Abhängigkeit von der Drehzahl bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten dargestellt. Zusätzlich wird in dieser Abbildung der Einfluß des Pitchwinkels verdeutlicht. Für jede Windgeschwindigkeit ergibt sich entsprechend dem eingestellten Pitchwinkel ( $\beta = 0^\circ, 1^\circ, 2^\circ$ ) eine andere Leistungskurve, wobei die erzielbare Leistung mit steigendem Pitchwinkel abnimmt. Die Steuerkennlinie muß sich ebenfalls mit dem Pitchwinkel ändern, d.h. es besteht ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen Steuerkennlinie und Pitchwinkel. Im vorliegenden Beispiel wurde die Steuerkennlinie bei dem Pitchwinkel  $\beta = 1^\circ$  vorgegeben. Wenn der Einsatz mit Primärregelung vorgesehen ist, dann stellt die Betriebsweise der Anlage bei  $\beta = 1^\circ$  den Normalbetrieb dar, d.h. bei einer Frequenzabweichung von  $\Delta f = 0$ . Die beiden anderen Steuerkennlinien ergeben sich rein rechnerisch, wenn bei gleicher Windgeschwindigkeit ein bestimmter Anteil Leistung mehr bzw. weniger geliefert werden soll. So wird durch die Steuerkennlinie bei  $\beta = 0^\circ$  die maximale Leistungsausbeute erreicht, vergleichbar mit dem Normalbetrieb der Anlage ohne Primärregelung. Bei der Steuerkennlinie mit  $\beta = 2^\circ$  erfolgt eine mini-

male Leistungsentnahme. Dabei ist der Übergang zwischen den Pitchwinkeln und damit auch zwischen den Steuerkennlinien kontinuierlich, es sind alle Zwischenwerte möglich. Durch geeignete Dimensionierung des durch die Steuerkennlinien vorgegebenen Regelbandes lässt sich ein dem Gridcode [4] entsprechender Primärregelbereich einstellen. Die in **Bild 3** dargestellten beispielhaften Steuerkennlinien wurden so berechnet, dass sich bei jeder Windgeschwindigkeit ausgehend von einem Pitchwinkel von  $\beta = 1^\circ$  eine Leistungsänderung von  $\pm 4\%$  erreichen lässt, immer bezogen auf den Leistungswert bei  $\beta = 1^\circ$ .

In **Bild 4** ist der interessierende Bereich der Kennlinien vergrößert dargestellt. Die Windkraftanlage wird anfangs im Arbeitspunkt A betrieben, das entspricht bei gegebener Windgeschwindigkeit 100% Leistung und einem Pitchwinkel von  $\beta = 1^\circ$ . Wird durch eine Frequenzabsenkung die maximale positive Primärregelleistung aktiviert, wandert der Arbeitspunkt in **Bild 4** von A nach B durch die Verstellung des Pitchwinkels von  $\beta = 1^\circ$  auf  $\beta = 0^\circ$ . Für den genauen Verlauf der Arbeitspunktverschiebung sind in den **Bildern 5** und **6** Beispiele angegeben. Die Anlage liefert jetzt bei gleichem Wind 4% mehr Leistung. Der umgekehrte Fall tritt ein bei einer Verschiebung des Arbeitspunktes in **Bild 4** von A nach C durch Verstellen des Pitchwinkels von  $\beta = 1^\circ$  auf  $\beta = 2^\circ$ . Hier liefert die An-



**Bild 3** Turbinenleistung und Steuerkennlinien bei verschiedenen Pitchwinkeln



**Bild 4** Stationäre Arbeitspunkte der Turbinenleistung bei verschiedenen Pitchwinkeln

lage jetzt bei gleichem Wind 4% weniger Leistung. Zusätzlich wird in diesem Beispiel sichtbar, dass die Windkraftanlage bei Leistungserhöhung die Drehzahl verringert, wodurch sehr schnell Rotationsenergie in das Netz gespeist werden kann. Bei Leistungsverringering erfolgt dagegen eine Drehzahlerhöhung, wodurch sehr schnell Rotationsenergie aufgenommen wird. Diese beiden Effekte wirken sich günstig auf das dynamische Regelverhalten aus.

#### 4 Simulationsbeispiel

Für die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebene 5-MW-Windkraftanlage wurde ein Modell mit der Software Matlab/Simulink erstellt. In Anlehnung an die Regeln des Gridcodes [4] wurde eine Primärregelleistung von  $\Delta P = \pm 4\%$  bei einer Statik von  $\sigma = 10\%$  eingestellt. Das bedeutet, bei einer Frequenzabweichung im Netz von  $\Delta f = \pm 200$  mHz soll eine Regelleistung von  $\Delta P = \pm 4\%$  bezogen auf die aktuelle Leistungsabgabe aktiviert werden.

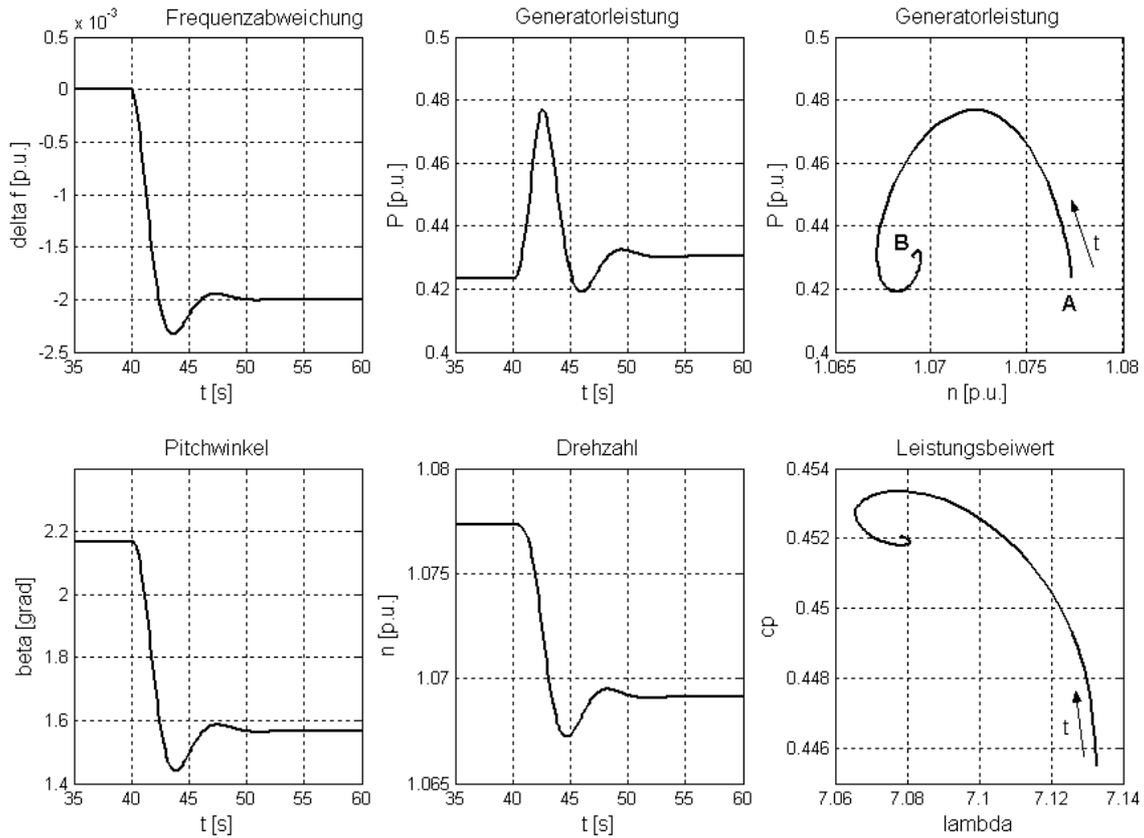
In **Bild 5** sind die Zeitverläufe verschiedener Größen der Windkraftanlage nach einem Frequenzeinbruch von 0,2% (100 mHz) dargestellt. Die Windgeschwindigkeit sei während des gesamten im Sekundenbereich ablaufenden Vorgangs konstant. Durch die Verringerung des Pitchwinkels von etwa  $2,2^\circ$  auf  $1,6^\circ$  erfolgt eine Leistungsanhebung um etwa 2%. Die Verstellung der Steuerkennlinie erfolgt hierbei in fester Relation

zum momentanen Pitchwinkel. Deutlich sichtbar ist die Abgabe der Rotationsenergie und die damit verbundene sehr schnelle zusätzliche Leistungseinspeisung in das Netz. Aus der Ortskurve des Leistungsbeiwertes  $c_P$  wird erkennbar, dass die erhöhte Leistungsabgabe nur durch eine Verbesserung des aerodynamischen Wirkungsgrades (Leistungsbeiwert  $c_P$ ) möglich ist.

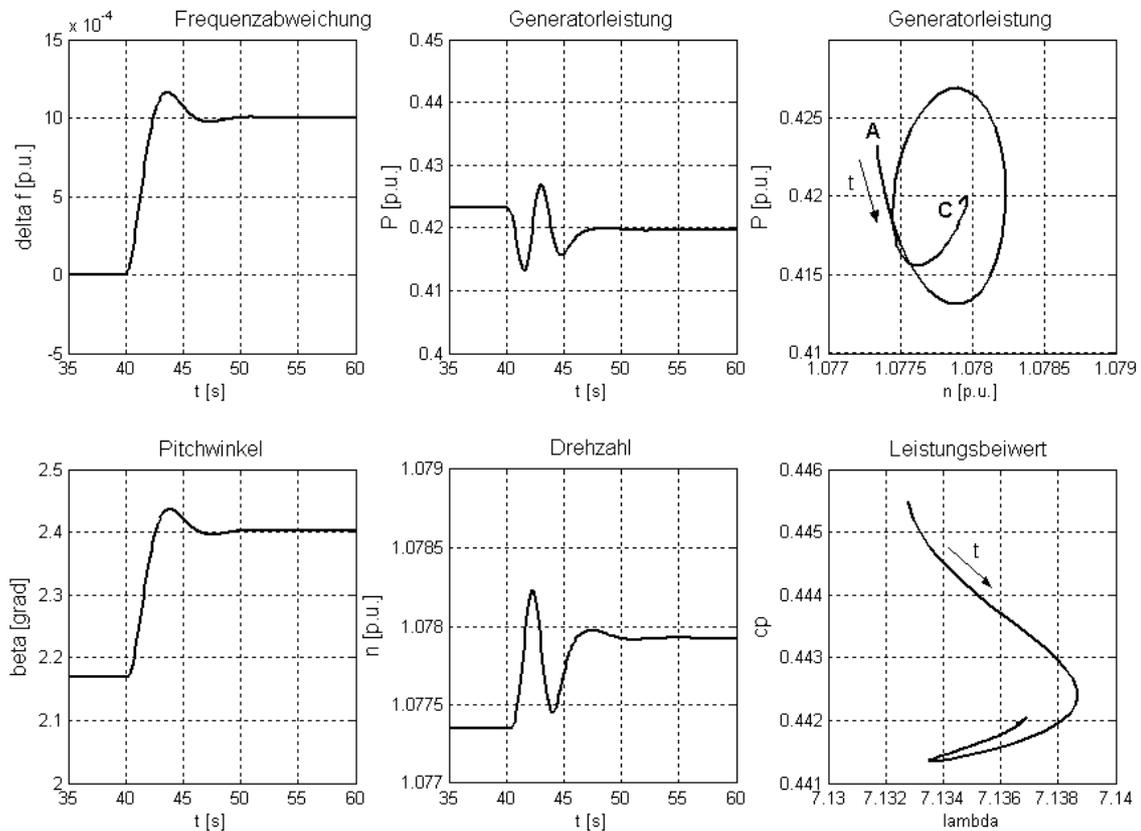
In **Bild 6** sind die Zeitverläufe nach einer Frequenzerhöhung von 0,1% (50 mHz) aufgezeichnet. Durch die Vergrößerung des Pitchwinkels von etwa  $2,2^\circ$  auf  $2,4^\circ$  verringert sich die abgegebene Leistung um ca. 1%. Die Leistungsabsenkung erfolgt zunächst sehr schnell durch das Einspeichern von Rotationsenergie bei Drehzahlerhöhung. Die Windgeschwindigkeit sei während des gesamten im Sekundenbereich ablaufenden Vorgangs wieder konstant. Der aerodynamische Wirkungsgrad (Leistungsbeiwert  $c_P$ ) muss sich verschlechtern. Die Zeitverläufe, insbesondere das Einschwingverhalten der Leistungen lassen sich durch verbesserte Reglereinstellungen weiter optimieren.

#### 5 Zusammenfassung

Der geplante weitere starke Ausbau der Windenergienutzung ergibt neue Anforderungen an die Betriebsweise der Windkraftanlagen. Insbesondere leistungsstarke Windparks im Offshore-Bereich sollten am



**Bild 5** Berechnete Zeitverläufe nach einer Frequenzänderung von  $\Delta f = -200$  mHz



**Bild 6** Berechnete Zeitverläufe nach einer Frequenzänderung von  $\Delta f = +100$  mHz

Netzeinspeiseknoten wie Kraftwerke betrachtet werden. Aufgrund der spezifischen Besonderheiten der Windenergie gegenüber konventionellen Energieträgern sind jedoch eine Reihe von Voruntersuchungen notwendig. Im vorliegenden Beitrag wurde die grundsätzliche Möglichkeit vorgestellt, im Sekundenbereich die Wirkleistung von Windkraftanlagen nicht nur abzuregeln sondern im Bedarfsfall auch zu erhöhen, da dabei konstante Windgeschwindigkeit vorausgesetzt werden kann. Ein Ausgleichen der Wirkleistungsschwankungen im Minutenbereich, verursacht durch die veränderliche Windgeschwindigkeit, ist dadurch jedoch nicht möglich. Die Einführung dieser Betriebsweise bei einer großen Anzahl von Windkraftanlagen könnte aber die Primärregelleistungsreserve im Sekundenbereich eines Übertragungsnetzbetreibers spürbar erhöhen.

## 6 Literatur

- [1] Neumann, T.: Weiterer Ausbau der Windenergienutzung im Hinblick auf den Klimaschutz. DEWI Magazin Nr. 19, 08/2001, S. 7 - 13
- [2] Ergänzende Netzanschlussregeln für Windenergieanlagen. E.on Netz
- [3] Gasch, R.: Windkraftanlagen. 3. Auflage, Verlag B.G. Teubner, Stuttgart, 1996
- [4] GridCode 2000, Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber, DVG, Heidelberg, 2000